

*В. Н. БРЕЕВ, В. И. ДЕНИСЕНКО,
В. Ф. ШУТЬКО*

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАСЫЩЕННОГО ВОЛЬТОДОБАВОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

При исследовании электромагнитных процессов в системе фазового компаундирования в аварийных и других переходных режимах синхронного генератора возникает необходимость учета насыщения вольтодобавочного трансформатора (ВДТ).

В трехфазной группе трех однофазных трансформаторов при отсутствии обмоток, соединенных треугольником, намагничивающая сила, соответствующая токам в линейных проводах каждой фазы, уравнивается падением магнитного напряжения сердечника. Поэтому для группового ВДТ математическое описание процессов с учетом его насыщения не вызывает затруднений. Связь между потокоцеплением взаимоиндукции и намагничивающим током повторяет магнитную характеристику сердечника трансформатора:

$$\Phi = (f) u, \quad (1)$$

где u — магнитное напряжение.

В трехстержневом ВДТ сердечники отдельных фаз совмещены в общем магнитопроводе, и при насыщении одного или нескольких стержней магнитное напряжение их отличается от мгновенных значений соответствующих намагничивающих сил. Это обстоятельство затрудняет определение магнитных потоков в стержнях.

Ниже дается вывод аналитических соотношений, описывающих процессы в трехфазном ВДТ.

Система намагничивающих сил (н.с.) f_i , где $i=a, b, c$, удовлетворяет условию:

$$f_a + f_b + f_c = 0. \quad (2)$$

Система магнитных потоков взаимоиндукции Φ_i при насыщении сердечника ВДТ не удовлетворяет такому условию.

Обозначим

$$\sum \Phi_i = \Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = 3\Phi_0, \quad (3)$$

где Φ_0 — поток нулевой последовательности.

Система потоков нулевой последовательности имеет место в обоих типах ВДТ — в групповом и трехстержневом, но в пер-

вом они замыкаются по сердечникам однофазных трансформаторов, а во втором — от ярма к яруму вне магнитопровода.

Уравнения магнитной цепи (рис. 1) трехстержневого трансформатора получают вид:

$$\left. \begin{aligned} f_a &= R_a \Phi_a + R_0 \Phi_0; \\ f_b &= R_b \Phi_b + R_0 \Phi_0; \\ f_c &= R_c \Phi_c + R_0 \Phi_0; \\ \Phi_0 &= \frac{1}{3} (\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

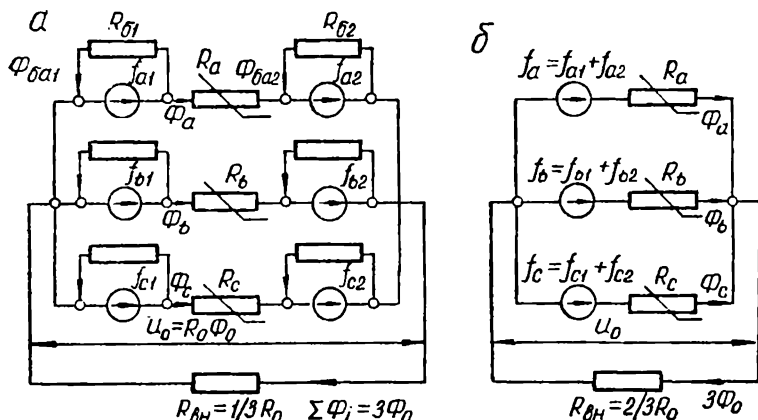


Рис. 1. Схема магнитной цепи трехстержневого трансформатора: а — полная; б — для потоков взаимной индукции в стержнях магнитопровода (R_{0H} — внешнее магнитное сопротивление от ярма к яруму на пути потоков нулевой последовательности).

Решение (4) относительно потоков Φ_i дает

$$\Phi_i = \frac{f_i - R_0 \Phi_0}{R_i} = \frac{f_i - U_0}{R_i}. \quad (5)$$

Величину $U_0 = R_0 \Phi_0$ в (5) будем называть магнитным напряжением нулевой последовательности. Физически она обусловлена совмещением фазных сердечников в общем магнитопроводе и проявляется между ярами трехстержневого магнитопровода при насыщении его стержней.

Отметим, что все соотношения являются общими для обоих типов ВДТ, различие заключается в величине параметра R_0 .

Согласно (5), с учетом (3) связанная магнитная цепь (рис. 1) может быть заменена тремя независимыми эквивалентными цепями, соответствующими отдельным фазам трехстержневого транс-

форматора. Из (5) также следует, что магнитное напряжение i -го стержня

$$U_i = f_i - U_0, \quad (6)$$

и по нему с помощью магнитной характеристики (1) определяется соответствующий магнитный поток. Этим преодолевается упомянутое выше затруднение при анализе процессов в трехстержневом трансформаторе.

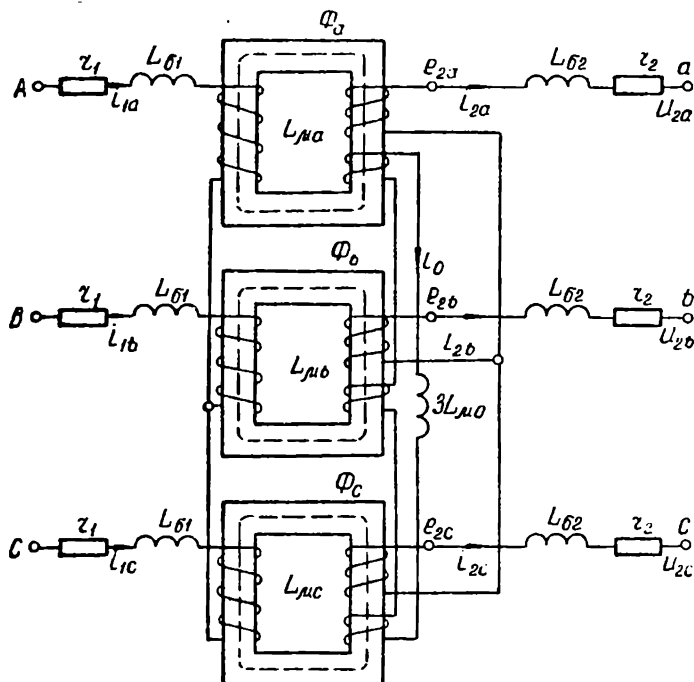


Рис. 2. Электрическая цепь с идеальными трехобмоточными трансформаторами, эквивалентная ВДТ.

Перейдем к электрическим параметрам трансформатора.

Умножив обе части уравнений (5) на число витков питающей обмотки и заменив $f_i = \omega L_{\mu i}$, где $i_{\mu i} = \frac{f_{1i} + f_{2i}}{\omega} = i_{1i} + i_{2i}$ — намагничивающий ток обеих обмоток стержня $i = a, b, c$, получим:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_{\mu a} &= L_{\mu a}(i_{\mu a} - i_0); \\ \Psi_{\mu b} &= L_{\mu b}(i_{\mu b} - i_0); \\ \Psi_{\mu c} &= L_{\mu c}(i_{\mu c} - i_0); \\ \Psi_0 &= L_{\mu 0}i_{\mu 0} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

или

$$\frac{\Psi_{\mu i}}{L_{\mu i}} = i_{\mu i} - i_0;$$

$$\frac{\Psi_0}{L_{\mu 0}} = i_0, \quad \Psi_0 = \frac{1}{3} \sum \Psi_{\mu i}, \quad (7a)$$

где $L_{\mu i} = \frac{\omega^2}{R_i}$ — статическое значение взаимной индуктивности ВДТ, приведенное к питающей обмотке;

$L_{\mu 0} = \frac{\omega^2}{R_0}$ — индуктивность, соответствующая магнитному сопротивлению потокам нулевой последовательности и приведенная к числу витков питающей обмотки.

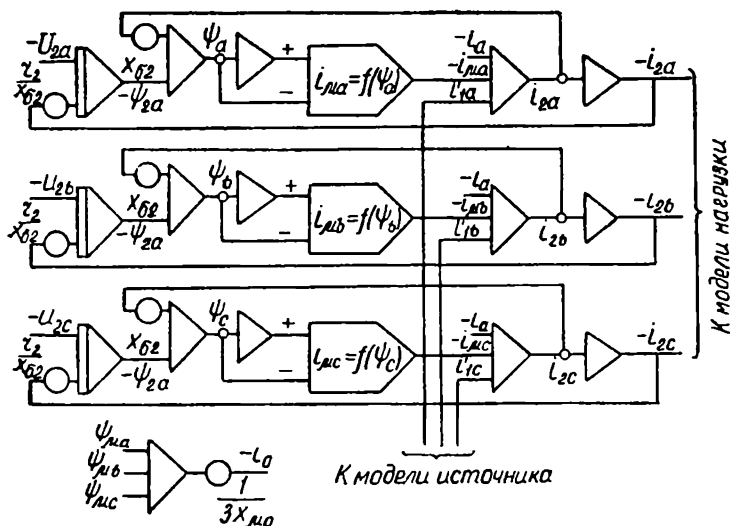


Рис. 3. Математическая модель ВДТ.

В системе относительных единиц, в которой угловая частота $\omega = 2\pi f$ потоков и напряжений принимается за базовую, величины $L_{\mu i}$ и $L_{\mu 0}$ в (7) и (7a) следует заменить реактивными сопротивлениями $x_{\mu i}$ и $x_{\mu 0}$ для основной частоты в относительных единицах.

Со схемой магнитной цепи на рис. 1 согласуется и удовлетворяет полученным выше соотношениям электрическая цепь (рис. 2), состоящая из трех одинаковых однофазных трансформаторов с идеальной магнитной связью между обмотками. Активные и реактивные сопротивления рассеяния фаз обмоток в этой цепи вынесены за пределы контура намагничивания. Третья обмотка — фиктивная с числом витков, равным числу витков той обмотки, к напряжению которой приводится трансформатор. Фазы

этой обмотки соединены в треугольник и замкнуты на индуктивность $3L_{\mu 0} = 3 \frac{\omega^2}{R_0}$.

Данная электрическая цепь весьма удобна для анализа электромагнитных процессов в ВДТ с различной конструкцией магнитопровода. Анализ может быть выполнен с помощью АВМ. Структурная схема модели ВДТ представлена на рис. 3. Особенности трехстержневого трансформатора, в отличие от известных схем моделей, учитываются в ней введением специального блока, соответствующего фиктивной обмотке с параметром $x_{\mu 0}$.

Вследствие относительно больших воздушных промежутков в стержнях ВДТ обладают соизмеримыми величинами L_{σ} , $L_{\mu 0}$ и ненасыщенного значения индуктивности L_{μ} . Так, магнитные проводимости (или соответствующие реактивные сопротивления) по путям рассеяния, между ярами вне сердечника и проводимость ненасыщенного стержня у трансформатора ТСВ-4000 с номинальным первичным током 3020 а по данным испытаний находятся в соотношении

$$\frac{x_{\sigma}}{x_{\mu}} 100\% \text{ до } 13\%;$$

$$\frac{x_{\mu 0}}{x_{\mu}} 100\% \approx 100\%.$$

При относительно глубоких насыщениях стержней отношение статических реактивностей увеличивается в 3—4 раза.

ВЫВОДЫ

1. Электромагнитные процессы в насыщенном ВДТ независимо от конструкции его магнитопровода (групповой или трехстержневой) описываются одними и теми же соотношениями, однако сами процессы в них различаются.

2. Особенности насыщения трехстержневого ВДТ при расчете электромагнитных процессов в анодной цепи преобразователя учитываются введением дополнительной фиктивной намагничивающей силы или намагничивающего тока нулевой последовательности, обусловленных магнитным напряжением между ярами магнитопровода.

3. Для определения дополнительной фиктивной намагничивающей силы необходимо знать величину магнитной проводимости между ярами вне магнитопровода по путям через внешнее пространство и кожух трансформатора. Эта проводимость соизмерима с проводимостью стержня. В частности, в трансформаторе ТСВ-4000 она примерно в 3 раза превышает проводимость ненасыщенного стержня.
